

بررسی عملکرد نزارهای مصنوعی در جریان ناپیوسته برای تصفیه فاضلاب شهری

علی ترابیان^۲علی اکبر عظیمی^۳ناصر مهرداد^۱ابوالفضل رحمانی ثانی^۱

(دریافت ۸۶/۱۱/۱۳ پذیرش ۸۷/۱۲/۱)

چکیده

نزارهای مصنوعی زیر سطحی از جمله روشهای تصفیه طبیعی فاضلاب شهری و صنعتی بوده که از نظر مصرف انرژی و هزینه بسیار مقرون به صرفه است. تحقیقات زیادی در خصوص عملکرد نزارها در جریان پیوسته انجام شده اما در جریان ناپیوسته اطلاعات کافی در دسترس نیست. در این تحقیق به بررسی بازده نزارها در جریان ناپیوسته پرداخته شد. دو واحد پیش تصفیه از نوع برکه بی‌هوازی مجهز به چاله هاضم و دو بستر نزار زیر سطحی هر کدام با زمان ماند ۲ روز در مقیاس صحرایی ساخته شد. برای پر کردن بسترها از ماسه نخودی با اندازه مؤثر ۵ میلی‌متر، ضریب یکنواختی ۱/۵ و با ضریب تخلخل ۳۵ در صد استفاده گردید. یک بستر و واحد پیش تصفیه به عنوان شاهد در نظر گرفته شد. فاضلاب کاربردی از نوع شهری با دبی ورودی ۲۶ مترمکعب در روز از شبکه شهری واقع در تصفیه‌خانه سبزوار انتخاب و پایلوت در مدت یک سال مورد بررسی قرار گرفت. متوسط بازده حذف BOD_5 ، TSS، TKN، TP و TC در جریان پیوسته برای ترکیب پیش تصفیه و نزار شاهد به ترتیب ۷۷/۲، ۹۲، ۹۱، ۸۹ و ۹۶/۵ درصد و در جریان ناپیوسته برای ترکیب پیش تصفیه و نزار مورد تحقیق به ترتیب ۹۷، ۹۷/۵، ۹۷، ۹۷ و ۹۵/۷۵ درصد به دست آمد. بازده حذف نزارهای مصنوعی زیر سطحی در جریان ناپیوسته افزایش قابل توجهی نسبت به جریان‌های پیوسته نشان می‌دهد. بنابراین در موارد آلودگی زیاد فاضلاب در صورت نبود زمین کافی برای گسترش نزار می‌توان از جریان ناپیوسته در بهره برداری بستر استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: پیش تصفیه، نزار مصنوعی زیر سطحی، جریان پیوسته، جریان ناپیوسته، تصفیه طبیعی فاضلاب، تالاب، تصفیه فاضلاب.

Performance of the Subsurface Flow Wetland in Batch Flow for Municipal Wastewater Treatment

Abolfazle Rahmani sani¹Nasser Mehrdadi²Ali akbar Azimi³Ali Torabian²

(Received Feb. 2, 2008 Accepted Feb. 20, 2009)

Abstract

Subsurface flow wetlands are one of the natural treatment methods used for municipal and industrial wastewater treatment that are economical in terms of energy consumption and cost-effectiveness. Much research has been conducted on wetland operation with continuous flow but not enough information is available on batch flow. This study investigates wetland efficiency in batch flow. For the purposes of this research, two pretreatment units of the anaerobic pond type with digestion pits and two subsurface flow wetlands with a 2-day detention time were built on the pilot scale. The cells were charged with sand of 5 mm effective size, uniformity coefficient of 1.5, and a porosity of 35%. One wetland cell and one pretreatment unit were used as control. The municipal wastewater selected to be monitored for the one-year study period had a flow rate of 26 m³/day and average BOD_5 of 250mg/l, TSS of 320mg/l, TKN of 35mg/l, TP of 12mg/l and TC of 2×10^8 MPN/100ml from Sabzevar Wastewater Treatment Plant. The average removal efficiencies of BOD_5 , TSS, TKN, TP, and TC in the continuous flow for the combined control pretreatment and wetland cell were 77.2%, 92%, 91%, 89%, 96.5% while the same values for the batch flow for the combined experimental pretreatment and wetland cell were 92%, 97%, 97.5%, 97%, and 99.75%, respectively. The removal efficiency in the

۱- استادیار دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی سبزوار (نویسنده مسئول)، ۴۴۴۶۰۷۰ (۰۵۷۱)، ars_se@yahoo.com

۲- Assoc. Prof., Dept. of Environmental Engineering, University of Tehran

۳- Assist. Prof., Dept. of Environmental Engineering, University of Tehran

۲- دانشیار دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

۳- استادیار دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران

subsurface flow wetlands in the batch flow was higher than that of the continuous flow. Thus, for wastewaters with a high pollution level, the batch flow can be used in cell operation in cases where there is not enough land for spreading the wetland cell.

Keywords: Pretreatment, Subsurface Flow Wetland, Continuous Flow, Batch Flow, Natural Treatment, Wetland, Wastewater Treatment.

۱- مقدمه

زیرسطحی برای تصفیه فاضلاب اخیراً توجه فراوانی را به خود معطوف کرده است، اما در خصوص بهره‌برداری این سیستم در جریان ناپیوسته و به شکل پایلوت صحرایی گزارش مستندی ارائه نگردیده است. عدم توجه کافی به مشکلات بهره‌برداری و نگهداری مانند ایجاد جریان‌های میان‌بر در بستر، رشد ناکافی نیزار و پایین بودن بازده خروجی از معضلاتی است که کمتر به آن پرداخته شده است لذا هدف اصلی این تحقیق بررسی شرایط مذکور برای بهبود بازده تصفیه فاضلاب در جریان ناپیوسته می‌باشد.

۲- مواد و روشها

این طرح در محل تصفیه‌خانه فاضلاب شهرستان سبزوار و با پشتیبانی مالی شرکت آب و فاضلاب خراسان رضوی در راستای طرحهای تحقیقاتی آن شرکت انجام شد.

۲-۱- واحدهای پایلوتی پیش تصفیه

کلیه مطالعات در شرایط محیطی و با استفاده از دو واحد پایلوت برکه بی‌هوازی مجهز به چاله هاضم با ابعاد سطحی 2×6 متر و عمق $4/4$ متر انجام گرفت. هر برکه توسط یک دیواره جداکننده در $1/5$ متر اول به دو واحد تقسیم گردید، به نحوی که در ورودی یک چاله هاضم به ابعاد سطحی $2 \times 1/5$ متر با زمان ماند ۱۲ ساعت و یک برکه بی‌هوازی به ابعاد سطحی $2 \times 4/5$ متر با زمان ماند ۳۶ ساعت تشکیل گردید (شکل ۱). برکه اول در جریان پیوسته به عنوان پیش



شکل ۱- هاضم بی‌هوازی در ورودی و برکه بی‌هوازی در ادامه

نیزارها زمین‌هایی هستند که سطح آب در آنها در طی سال به مدت طولانی بالای سطح زمین یا نزدیک به سطح زمین قرار دارد. این امر به حفظ شرایط اشباع خاک و رشد گیاهان مورد نظر کمک می‌کند. گونه‌های گیاهی برآمده از آب همچون لویی، بوریا و نی شنی از معمول‌ترین اجزای سیستم‌های نیزار می‌باشند [۱]. نیزارهای مصنوعی برای تصفیه انواع متنوعی از فاضلابها شامل فاضلابهای شهری، صنعتی، کشاورزی، سیلابها و آبهای سطحی آلوده رودخانه‌ها و دریاچه‌ها مناسب می‌باشند [۲]. انواع سیستم‌های نیزار که برای تصفیه فاضلاب احداث می‌شوند عبارت‌اند از: سیستم‌های جریان سطحی آب، جریان زیر سطحی آب و جریان عمودی. سیستم‌های جریان زیرسطحی از یک سری کانال‌ها یا ترانشه‌هایی آبدی شده توسط غشاء نفوذناپذیر یا حوضچه‌هایی در ابعاد وسیع و لایه‌های شن برای ایجاد محیط رشد گیاهان تشکیل شده‌اند. در این سیستم‌ها مخزن، خاکبرداری شده و با مواد متخلخل مانند شن پر می‌شود و آب در زیرسطح زمین جریان می‌یابد. معمولاً عمق بسترهای شنی بین $0/1$ تا $0/6$ متر است [۳]. بهره‌برداری از نیزارهای مصنوعی با جریان ناپیوسته توسط مک برد^۱ و تانر^۲ [۴]، اتواستین^۳، سلما^۴ و آلن گزارش شده است [۴-۷]. آنها جریان ناپیوسته را در بسترهای با نیزار و بدون نیزار به کار برده و بالا بودن بازده حذف در بسترهای پوشیده از نی را نسبت به بسترهای بدون نی گزارش نمودند. سلما با احداث هفت بستر نیزار زیرسطحی پوشیده از نی و چهار بستر زیر سطحی بدون نی در مقایسه آزمایشگاهی، جریان ناپیوسته را مورد آزمایش قرار داد و بازده حذف BOD_5 ، TOC ، TSS ، NO_3-N ، NH_4-N و TP را در هر دو بستر نزدیک به هم گزارش کرد [۶].

برکه‌های بی‌هوازی با اعماق ۳ تا ۵ متر و زمان ماند ۵ تا ۵۰ روز احداث می‌گردند [۸]. برای شرایط بی‌هوازی میزان بار حجمی برکه‌ها تا $400-200 \text{ gBOD}_5/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ می‌رسد [۹ و ۱۰]. این برکه‌ها در فصل سرد عموماً به عنوان ته‌نشینی جامدات عمل می‌کنند ولی در فصل گرم با افزایش دمای محیط ($T > 20^\circ\text{C}$) تا ۷۰ درصد کاهش BOD_5 دارند [۱۱ و ۱۲]. اگر چه استفاده از نیزارهای مصنوعی

¹ Mc Bride

² Tanner

³ Ottostein

⁴ Selma

شد. به این صورت که طی دوره دو روزه، جریان به طور متناوب قطع و وصل گردید تا جریان ناپیوسته تحقق یابد.

عملکرد پیش تصفیه شاهد و مورد تحقیق در ترکیب با نیزارهای مصنوعی زیرسطحی با زمان ماند هیدرولیکی ۲ روز در مدت یک سال آزمایش گردید. آزمایش‌های به عمل آمده شامل BOD_5 ، TSS، TKN، TP، TC، دما و قلیائیت بود. نمونه‌های فاضلاب، هفته‌ای دوبار و هربار به صورت مرکب ۴ ساعته تهیه و نتایج آنها بر اساس روش متوسط شنآوری استخراج شد و نمونه‌گیری از مکان ورودی برکه‌های بی‌هوایی، خروجی چاله‌های هاضم، خروجی برکه‌های بی‌هوایی و خروجی‌های نیزارهای زیرسطحی تهیه و بلافاصله به آزمایشگاه موجود در محل تصفیه‌خانه انتقال داده شد. نمونه‌های فاضلاب با استفاده از روشهای موجود در کتاب استاندارد متد، مورد آزمایش قرار گرفتند (جدول ۱ و ۲) [۱۳].



شکل ۳- بستر نیزار زیرسطحی



شکل ۴- لوله‌های توزیع فاضلاب ورودی به بستر نیزار زیرسطحی

۳- نتایج و بحث

در جدول ۱ ترکیب پیش تصفیه و بستر نیزار شاهد در جریان پیوسته بر حسب مقدار متوسط ارائه شده است. ترکیب پیش تصفیه و نیزار تحقیق در جریان ناپیوسته در جدول ۲ مشاهده می‌شود. جدول ۳ درصد افزایش بازده حذف در جریان ناپیوسته را نسبت به جریان پیوسته در واحدهای پایلوتی نمایش می‌دهد. در شکل ۵

تصفیه شاهد و برکه دوم با جریان ناپیوسته به عنوان پیش تصفیه مورد تحقیق، انتخاب گردید. رژیم جریان در چاله هاضم به گونه‌ای تعیین شد که فاضلاب از عمق ۴ متری وارد و طی جریان بالا رونده از لوله سرریز به داخل برکه ریزش کند. به منظور جلوگیری از فرار لایه چربی، روغن و لجن‌های شناور از سطح هاضم یک زانو و لوله کوتاه پلیکا در مدخل لوله سرریز تا عمق ۵۰ سانتی‌متری هاضم قرار داده شد تا جریان فاضلاب از زیر لایه سطحی وارد لوله شده و به داخل برکه ریزش نماید (شکل ۲).



شکل ۲- تجمع چربی، روغن و لجن در سطح هاضم بی‌هوایی

۲-۲- واحدهای پایلوتی نیزارهای مصنوعی زیرسطحی

دو واحد پایلوت صحرایی نیزار زیرسطحی به ابعاد سطحی $20 \times 6/5$ متر و با عمق ۶۰ سانتی‌متر ساخته شد. یک بستر در ترکیب با پیش تصفیه شاهد و بستر دوم در ترکیب با پیش تصفیه تحقیق سری شد. کلیه مراحل طراحی و ساخت دو بستر نیزار یکسان بود. بسترها با زمان ماند هیدرولیکی ۲ روز و میزان بارگذاری ۶۵ کیلوگرم بر هکتار در روز بهره‌برداری گردید. برای پرکردن بسترها از ماشه نخودی به قطر ۵ تا ۹ میلی‌متر، اندازه مؤثر ۵ میلی‌متر، ضریب یکنواختی ۱/۵ و با ضریب تخلخل ۳۵ درصد استفاده گردید (شکل ۳). جریان ورودی بسترها توسط شبکه لوله‌گذاری ورودی در فاصله ۱ متری از هم به داخل بسترها وارد شده و از انتهای بستر توسط سیستم زهکش از سه خروجی پساب تصفیه شده جمع‌آوری گردید (شکل ۴). یک مخزن به ابعاد $4 \times 2 \times 2$ متر برای جمع‌آوری پساب تصفیه شده احداث و توسط لوله‌گذاری، پساب آن به خارج از تصفیه‌خانه منتقل شد. گیاه نی از نوع بوریا از رودخانه فصلی کال شور در مجاورت تصفیه‌خانه جمع‌آوری شده و در عمق ۳۰ سانتی‌متر و با فواصل ۵۰ سانتی‌متر از طرفین در داخل بسترها کاشته شد. در طول دوره بهره‌برداری سطح آب حدود ۱۰ سانتی‌متر زیر سطح بستر نگهداری می‌شد. با توجه به زمان ماند پیش تصفیه و بستر نیزار، جریان ناپیوسته برای مدت ۲ روز تعیین

جدول ۱- ترکیب پیش تصفیه و بستر نیزار شاهد در جریان پیوسته (مقادیر متوسط)

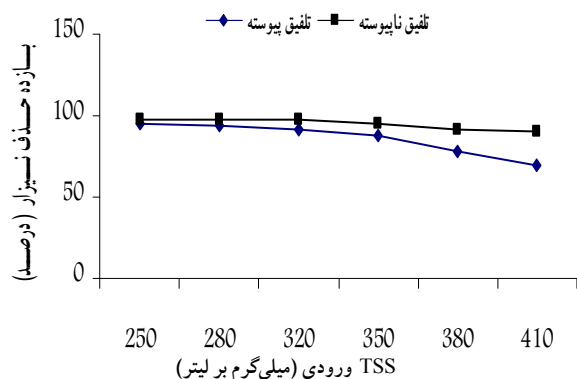
پارامتر	ورودی به هاضم	خروجی از هاضم	خروجی از برکه	خروجی از نیزار
BOD ₅ (mg/L)	۲۵۰	۱۳۵	۸۸	۲۰
TSS (mg/L)	۳۲۰	۱۷۳	۱۱۲	۲۵
TKN (mg/L)	۳۵	۲۴	۱۷	۱/۱
TP (mg/L)	۱۲	۱۰/۲	۸/۷	۰/۵
TC (MPN/100ml)	۲×۱۰ ^۸	۱/۳×۱۰ ^۸	۴/۵×۱۰ ^۷	۴/۵۲×۱۰ ^۵

جدول ۲- ترکیب پیش تصفیه و بستر نیزار تحقیق در جریان ناپیوسته (مقادیر متوسط)

پارامتر	ورودی به هاضم	خروجی از هاضم	خروجی از برکه	خروجی از نیزار
BOD ₅ (mg/L)	۲۵۰	۱۸۲/۵	۱۴۹	۷۱
TSS (mg/L)	۳۲۰	۱۴۱	۱۰۳	۴۹
TKN (mg/L)	۳۵	۲۶	۲۱/۵	۳
TP (mg/L)	۱۲	۱۰/۹	۹/۹	۱/۲
TC (MPN/100ml)	۲×۱۰ ^۸	۱/۷×۱۰ ^۸	۸/۶×۱۰ ^۷	۶/۲×۱۰ ^۶

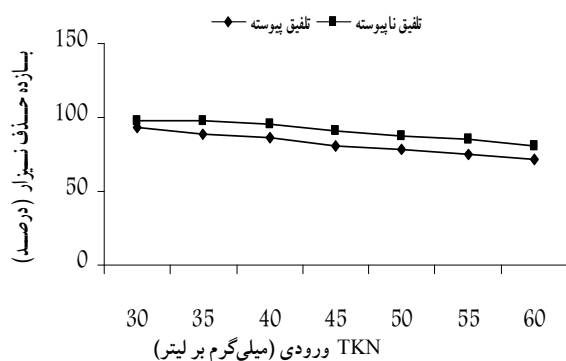
جدول ۳- درصد افزایش بازده حذف در جریان ناپیوسته نسبت به جریان پیوسته در واحدهای پایلوتی

پارامتر	برکه بی‌هوازی	نیزار مصنوعی	تلفیق برکه و نیزار
BOD ₅	۲۴	۲۵	۱۵
TSS	۱۴	۲۲	۵
TKN	۱۵	۱۰	۶/۵
TP	۱۰	۱۳	۸
TC	۱۸	۷	۳/۲

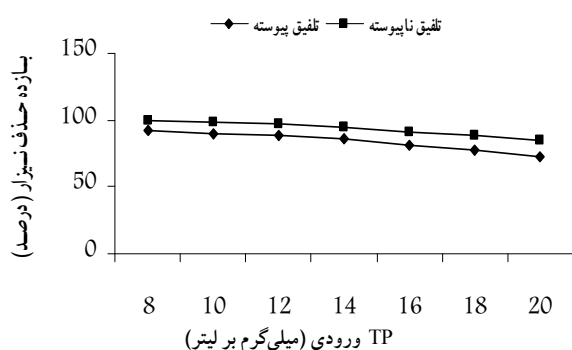


شکل ۶- مقدار متوسط سالانه بازده حذف TSS نیزار در جریان پیوسته و ناپیوسته

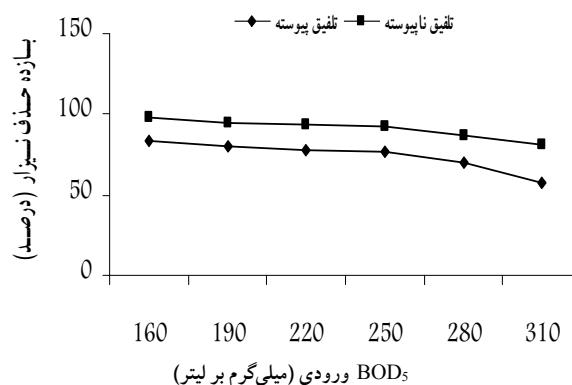
حذف BOD₅، شکل ۶ حذف TSS، شکل ۷ حذف TKN، شکل ۸ حذف TP و در شکل ۹ حذف TC در حالت‌های جریان پیوسته و ناپیوسته بر حسب مقدار متوسط در طول یک سال، در پایلوت نشان داده شده است.



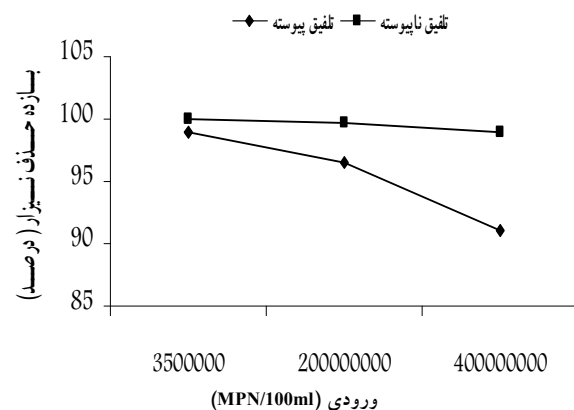
شکل ۷- مقدار متوسط سالانه بازده حذف TKN نیزار در جریان پیوسته و ناپیوسته



شکل ۸- مقدار متوسط سالانه بازده حذف TP نیزار در جریان پیوسته و ناپیوسته



شکل ۹- مقدار متوسط سالانه بازده حذف BOD₅ نیزار در جریان پیوسته و ناپیوسته



شکل ۹- مقدار متوسط سالانه بازده حذف TC نیزار در جریان پیوسته و ناپیوسته

۱-۳- حذف BOD₅

در جریان پیوسته، متوسط بازده حذف واحد پیش تصفیه ۴۱ درصد، نیزار زیر سطحی ۵۳ درصد و در مجموع ۷۷/۲ درصد و در جریان ناپیوسته متوسط بازده حذف پیش تصفیه ۶۵ درصد، نیزار زیر سطحی ۷۸ درصد و در مجموع ۹۲ درصد به دست آمد. گلوینا^۱ گزارش داد در برکه‌های بی‌هوای در دمای ۲۲ درجه سانتی‌گراد و زمان ماند ۲ روز بازده حذف BOD₅ ۴۲ تا درصد قابل انتظار است ولی به چگونگی رژیم جریان در برکه اشاره‌ای نکرده است [۱۴]. در این تحقیق با قرار دادن چاله هاضم در مسیر فاضلاب ورودی و ایجاد جریان رو به بالا در آن تا میزان زیادی از ایجاد اتصال کوتاه در برکه جلوگیری شد و همچنین تماس میکروارگانیسم‌های ورودی با لجن ته‌نشینی افزایش یافت. از آنجا که در برکه‌های بی‌هوای به دلیل ته‌نشینی جامدات آلی و تجزیه بی‌هوای آنها، BOD₅ کاهش می‌یابد متوسط سالانه بازده حذف بیشتر می‌شود. در جریان ناپیوسته بازده حذف برکه بی‌هوای ۲۴ درصد افزایش پیدا کرد و خروجی برکه به ۸۸ میلی‌گرم در لیتر کاهش پیدا نمود که نسبت به جریان پیوسته، ۶۱ میلی‌گرم در لیتر کمتر شده بود (جدول ۲). این امر نشان می‌دهد که با ایجاد جریان ناپیوسته در برکه، جریان‌های میان‌بر به‌طور کامل حذف شده و به‌طور هم‌زمان با افزایش زمان ماند به ۴ روز، روند تجزیه بی‌هوای کامل‌تر و بازده حذف افزایش می‌یابد؛ زیرا در طی جریان ناپیوسته و خصوصاً در روزهای گرم، افزایش تولید گازهای حاصل از تجزیه بی‌هوای به‌شکل حباب در سطح برکه مشاهده شد. در نیزارهای زیر سطحی مواد آلی کربنی و نیتروژنی به دو روش هوای و بی‌هوای تجزیه می‌گردند و میزان بازده حذف متأثر از عواملی مانند درجه حرارت، میزان بارگذاری و

زمان ماند هیدرولیکی می‌باشد [۱۵]. میزان اکسیژن ورودی به بستر از دو روش تأمین می‌گردد، اول از طریق ساقه و برگ نی و دوم از طریق نفوذ سطحی در اثر اختلاف غلظت اکسیژن داخل و خارج بستر. سلما با استفاده از یک پایلوت آزمایشگاهی و بهره‌برداری در جریان ناپیوسته از افزایش بازده حذف COD گزارش داد بدون آنکه به مشخصات پیش تصفیه نیزار اشاره کند [۶]. اوتو و همکاران در یک نیزار آزمایشگاهی با زمان ماند هیدرولیکی ۲ روز و با شرایط کنترل شده افزایش حذف COD تا ۹۰ درصد را گزارش داد [۱۶]. در این پایلوت با شرایط طبیعی محیط، متوسط بازده حذف BOD₅ در جریان ناپیوسته با توجه به پیش تصفیه ساخته شده ۹۲ درصد به دست آمد که نسبت به جریان پیوسته ۱۵ درصد افزایش داشت و خروجی آن در اندازه استانداردهای زیست محیطی بود (جدول ۲). شکل ۵ تلفیق برکه بی‌هوای و نیزار زیر سطحی را در دو حالت جریان پیوسته و ناپیوسته نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد با توجه به یکسان بودن دبی ورودی و مساحت نیزار برای هر دو تلفیق، در BOD₅ برابر ۱۶۰ میلی‌گرم در لیتر، اختلاف بازده ۱۴ درصد می‌باشد. اما با افزایش بار آلی این اختلاف بیشتر شده به‌طوری که در BOD₅ برابر ۱۰ میلی‌گرم در لیتر این اختلاف به ۲۴ درصد می‌رسد. این به آن معنی است که با افزایش میزان بارگذاری ورودی، اهمیت جریان ناپیوسته بیشتر می‌شود، زیرا بدون افزایش ابعاد بستر، زمان ماند آن زیاد می‌شود و بازده حذف افزایش می‌یابد. با توجه به مساحت ۱۳۰ متر مربعی بستر نیزار، در جریان پیوسته در ازای هر متر مربع، بازده حذف به‌طور متوسط ۰/۵۹ درصد و در جریان ناپیوسته ۰/۷ درصد نشان داده شده است؛ یعنی حدود ۱/۲ برابر افزایش دارد، بنابراین نتیجه گرفته می‌شود که در بارگذاری متوسط سالانه با BOD₅ برابر ۲۵۰ میلی‌گرم در لیتر برای افزایش بازده حذف از ۷۷ به ۹۲ درصد یا باید نیزار در جریان ناپیوسته بهره‌برداری گردد و یا آنکه مساحت نیزار به ۱۵۶ متر مربع افزایش یابد.

۲-۳- حذف TSS

متوسط بازده حذف TSS در جریان پیوسته در واحد پیش تصفیه ۶۸ درصد، در نیزار زیر سطحی ۵۵ درصد و در مجموع ۹۲ درصد و در جریان ناپیوسته در واحد پیش تصفیه ۸۲ درصد، در نیزار زیر سطحی ۷۷ درصد و در مجموع ۹۷ درصد به دست آمد. حذف TSS در برکه‌های بی‌هوای متأثر از زمان ماند و درجه حرارت می‌باشد [۱۴]. راجهانداری^۲ در یک برکه بی‌هوای با زمان ماند

² Rajbhandari

¹ Gloyna

افزایش بازده از ۹۲ به ۹۷ درصد یا باید از جریان ناپیوسته استفاده کرد و یا مساحت بستر به ۱۳۷ متر مربع افزایش یابد.

۳-۳- حذف TKN

متوسط بازده حذف TKN در جریان پیوسته در واحد پیش تصفیه ۳۷ درصد، در نیزار زیر سطحی ۸۳ درصد و در مجموع ۹۱ درصد و در جریان ناپیوسته در واحد پیش تصفیه ۵۲ درصد، در نیزار زیر سطحی ۹۳ درصد و در مجموع ۹۷/۵ درصد به دست آمد. آرسی والا^۳ حذف نیتروژن در برکه‌های تثبیت را در اثر دنیتریفیکاسیون، جذب جلبکی و تراوش می‌داند و معتقد است در برکه‌های بی‌هوازی دنیتریفیکاسیون مهم‌ترین علت حذف TKN می‌باشد [۱۹]. در این تحقیق واحد پیش تصفیه در جریان پیوسته عملکرد مطلوبی داشته است، زیرا با توجه به پیشنهادات آرسی والا مبنی بر افزایش تماس آب برکه با لجن کف در راستای افزایش دنیتریفیکاسیون، این کار در چاله هاضم واحد پیش تصفیه صورت پذیرفته است. در جریان ناپیوسته بازده حذف TKN، ۱۵ درصد افزایش یافته است که نشان دهنده تأثیر افزایش زمان ماند و متعاقب آن افزایش تماس دنیتریفیکاسیون^۴ اختیاری با لجن کف برکه می‌باشد. حذف مواد آلی نیتروژن‌دار در نیزار به دو روش هوازی و بی‌هوازی می‌باشد. حذف هوازی توسط اکسیژن موجود در اطراف ریشه‌ها، حذف بی‌هوازی در منطقه دور از ریشه و در کف بستر توسط میکروارگانیسم‌های اختیاری نیتروژن و همچنین حذف آمونیاک توسط نیتریفیکاسیون-دی نیتریفیکاسیون صورت می‌گیرد [۱۶]. نتایج حاصل از تحقیقات ولورن و همکاران^۵، یانگ^۶، آپتون^۷ و گرین^۸ و پایلوت‌های سانتی کالیفرنیا همگی به یک نکته اشاره دارد که حذف نیتروژن در نیزار به مشخصات بستر، شرایط آب و هوایی، میزان بارگذاری، زمان ماند هیدرولیکی و از همه مهم‌تر به نوع گیاه نی بستگی دارد [۲]. به این صورت که گیاه نی بوریا بیشترین بازده حذف را در بین سایر نی‌ها داشته و در بستر با اقطار شن درشت‌تر، میزان حذف بیشتر از بستر با اقطار ریزتر می‌باشد. در این تحقیق با استفاده از نی بوریا، انتخاب اندازه ۵ تا ۹ میلی‌متر برای ماسه، پیش تصفیه مناسب و وجود آب و هوای گرمسیری منطقه سبزوار، بازده حذف TKN در جریان پیوسته ۹۱ درصد به دست آمد. به نحوی که خروجی نیزار به ۳ میلی‌گرم بر لیتر کاهش یافت (جدول ۱). در جریان ناپیوسته بازده حذف حدود ۶/۵ درصد افزایش می‌یابد و خروجی بستر به میزان مطلوب ۱/۱ میلی‌گرم در لیتر می‌رسد که متأثر از

۱۲/۵ روز بازده حذف TSS را در جریان پیوسته ۹۲ درصد گزارش کرد [۱۷]. در پایلوت ساخته شده با اضافه شدن چاله هاضم و ایجاد جریان رو به بالا عامل دیگری به نام فیلتر بیولوژیکی حاصل از لجن‌های هاضم اضافه شد که در افزایش بازده حذف برکه مؤثر بود. بنابراین بازده حذف برکه حتی در جریان پیوسته قابل قبول بود (جدول ۱). در جریان ناپیوسته بازده حذف برکه ۱۴ درصد افزایش یافته است که نشان می‌دهد جامدات معلق پس از گیر افتادن در فضای لجن معلق اگر فرصت بیشتری پیدا گردد، بر میزان چسبندگی آنها به لجن افزوده می‌گردد (جدول ۲). در نیزارهای زیر سطحی حذف جامدات به روش فیلتراسیون و ته‌نشینی اتفاق می‌افتد [۶]. در مراجع متعددی از نیزارهای مصنوعی به عنوان یک روش مؤثر برای کاهش TSS یاد شده است. مانند هامر^۱، سلما و مولی^۲ و همکاران ولی در هیچ‌کدام از آنها به بازده ۹۲ درصد با زمان ماند هیدرولیکی ۲ روز اشاره نشده است. بنابراین تأثیر پیش تصفیه مناسب قبل از نیزار کاملاً مشخص می‌گردد [۱۵، ۶ و ۱۸]. در جریان ناپیوسته بازده حذف TSS در مجموع ۵ درصد افزایش نشان می‌دهد که کمتر از اختلاف بازده حذف BOD₅ در جریان ناپیوسته است که مؤید این نکته است که با توجه به هزینه‌های تأمین جریان ناپیوسته، هرگاه صرفاً حذف TSS مدنظر باشد ایجاد جریان ناپیوسته ضرورتی ندارد. همان‌طور که در جدولهای ۱ و ۲ مشاهده می‌گردد مقادیر TSS خروجی از سیستم شاهد کمی بالاتر و در سیستم تحقیق پایین‌تر از استاندارد زیست محیطی می‌باشد.

شکل ۶ بازده حذف TSS را در طول بهره‌برداری پایلوت نشان می‌دهد. همانند حذف BOD₅ در مقادیر پایین TSS ورودی، اختلاف بازده جریان پیوسته و ناپیوسته کم است (۳ درصد) ولی با افزایش مقادیر ورودی این اختلاف زیاد شده و به ۲۰ درصد می‌رسد (به علت روی هم قرار گرفتن اعداد در این شکل از نشان دادن آنها صرف نظر شده است). این مطلب نشان دهنده آن است که در اثر جریان ناپیوسته و یا متعاقب آن افزایش زمان ماند با توجه به یکسان بودن شرایط دو بستر در فیلتراسیون جامدات معلق، باید پس از گیر افتادن جامدات در فضای ریشه و بستر، زمان کافی برای افزایش نیروی چسبندگی ذرات به همدیگر و به محیط فراهم باشد تا در اثر افزایش حجم ذرات، نیروهای برشی حاصل از عبور جریان باعث شسته شدن آنها نگردد. با توجه به شکل ۶ در مقادیر متوسط TSS برابر ۳۲۰ میلی‌گرم در لیتر ورودی، بازده حذف در جریان ناپیوسته ۵ درصد افزایش نشان می‌دهد، با توجه به آنکه در جریان پیوسته در ازای هر متر مربع از بستر ۰/۷ درصد و در جریان ناپیوسته ۰/۷۴ درصد بازده حذف TSS می‌باشد، لذا به منظور

³ Arceivala

⁴ Denitrify

⁵ Velvorn et al.

⁶ Yang

⁷ Abton

⁸ Green

¹ Hammer

² Molle

افزایش زمان ماند در بازده بستر می‌باشد (جدول ۲). شکل ۷ حذف TKN را در مدت بهره‌برداری پایلوت نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌گردد در TKN برابر ۳۰ میلی‌گرم در لیتر اختلاف بازده حذف در جریان پیوسته و ناپیوسته ۵ درصد است و این عدد در TKN برابر ۶۰ میلی‌گرم در لیتر به ۹ درصد می‌رسد. بنابراین در مقایسه با BOD خلیلی کمتر است و این به آن مفهوم است که حداکثر حذف TKN در همان زمان ماند هیدرولیکی ۲ روز انجام شده است و تأثیر افزایش زمان ماند، بعد از سایر پارامترهای تأثیر گذار می‌باشد که در این تحقیق رعایت گردیده است. مطابق شکل ۷، در TKN برابر ۳۵ میلی‌گرم در لیتر در ازای هر متر مربع از بستر در جریان پیوسته ۰/۷ درصد و در جریان ناپیوسته ۰/۷۵ درصد بازده حذف می‌باشد. بنابراین برای افزایش بازده از ۸۹ به ۹۷/۵ درصد یا بایستی جریان ناپیوسته برقرار گردد و یا آنکه مساحت بستر به ۱۳۹ متر مربع افزایش یابد.

۴-۳- حذف TP

متوسط بازده حذف فسفر در جریان پیوسته در واحد پیش تصفیه ۱۷ درصد، در بستر شاهد ۷۸ درصد و در مجموع ۸۹ درصد و در جریان ناپیوسته در واحد پیش تصفیه ۲۷ درصد، در بستر تحقیق ۹۱ درصد و در مجموع ۹۷ درصد به دست آمد. مطابق با تحقیق انجام شده توسط آرسی والا در برکه‌های تثبیت حذف فسفر به دو روش جذب جلبکی و ترسیب به صورت هیدروکسی آپاتیت کلسیم می‌باشد که این رسوب به شدت به pH وابسته است و در pH بیشتر از ۸/۲ بر میزان رسوبات افزوده می‌شود [۱۹]. در این تحقیق به دلیل عدم رشد جلبکی در محیط بی‌هوازی بازده حذف منوط به ترسیب بود و چون pH آب برکه در دوره بهره‌برداری در حد متوسط ۶/۹ تا ۸ حفظ شد بازده حذف فسفر در هر دو جریان پیوسته و ناپیوسته قابل توجه نبود. حذف فسفر در نزارهای زیر سطحی عموماً به روش ترسیب بر روی مدیای بستر و ریشه‌ها می‌باشد، ضمن آنکه مقداری از آن جذب گیاه شده و صرف رشد نزار می‌گردد [۱۶]. در کشور دانمارک با نمونه‌برداری مرکب از ۴۲ بستر نزار زیر سطحی و انجام آزمایش‌ها، توصیه گردید به منظور تثبیت فسفر و فلزات سنگین مقدار مناسبی از خاک رس در لایه زیرین بستر استفاده گردد [۲]. ولورن و همکاران در یک بستر نزار با زمان ماند هیدرولیکی ۱ روز بازده حذف فسفر را برای نی بوریا ۳۰ درصد، در نی لویی ۵۰ درصد و در نی سنی ۶۶ درصد گزارش نمودند [۲]. در پایلوت نزار ساخته شده در این تحقیق، کف هر دو بستر از خاک رس متراکم شده ساخته شد و با توجه به سایر مشخصات بستر که قبلاً ذکر گردید، بازده حذف بستر در جریان پیوسته ۸۵ درصد به دست آمد. به نحوی که خروجی آن به ۱/۲

میلی‌گرم بر لیتر کاهش پیدا کرد (جدول ۱). این کاهش نشان می‌دهد که علاوه بر زمان ماند پارامترهای مهم دیگری مانند مساحت و عمق بستر، قطر شنزار، شرایط آب و هوایی و میزان بارگذاری، در بازده حذف فسفر دخالت دارند.

در شکل ۸ بازده حذف TP در طول دوره بهره‌برداری نشان داده شده است. مطابق شکل در TP برابر ۸ میلی‌گرم در لیتر اختلاف بازده جریان پیوسته و ناپیوسته حدود ۷ درصد و در TP برابر ۲۰ میلی‌گرم در لیتر ۱۲ درصد می‌باشد که نشان می‌دهد تأثیر جریان ناپیوسته در حذف TP بیش از TKN می‌باشد. در مقادیر متوسط TP برابر ۱۲ میلی‌گرم در لیتر، در ازای هر متر مربع از بستر نزار در جریان پیوسته ۰/۶۸ درصد و در جریان ناپیوسته ۰/۷۴ درصد بازده حذف داشته است، بنابراین به منظور افزایش بازده از ۸۹ به ۹۷ درصد یا باید از جریان ناپیوسته استفاده نمود و یا آنکه مساحت بستر به ۱۴۱ متر مربع افزایش یابد.

۵-۳- حذف TC

متوسط بازده حذف کل کلیفرم در جریان پیوسته در واحد پیش تصفیه ۵۷ درصد، در نزار زیر سطحی ۹۲ درصد و در مجموع ۹۶/۵ درصد و در جریان ناپیوسته در واحد پیش تصفیه ۷۵ درصد، در نزار زیر سطحی ۹۹ درصد و در مجموع ۹۹/۷۵ درصد به دست آمد. حذف کلیفرم در واحد پیش تصفیه به دلیل ته‌نشینی در زمان ماند برکه می‌باشد و با افزایش زمان ماند بازده حذف افزایش می‌یابد [۱۴]. تحقیقات انجام شده در باره حذف کل کلیفرم در برکه‌ها نشان می‌دهد با افزایش تعداد برکه‌ها به شکل سری پشت سر هم بازده حذف به شدت افزایش می‌یابد که در این خصوص می‌توان به گزارش دانشکده علوم پزشکی اصفهان اشاره نمود که با سری کردن هفت برکه شامل یک برکه بی‌هوازی، چهار برکه اختیاری و دو برکه تکمیلی در تصفیه‌خانه فولاد شهر اصفهان کل کلیفرم ورودی از $10^7 \times 7$ به $10^3 \times 3$ تقلیل یافت [۲۰]. بنابراین در واحد پیش تصفیه با ایجاد جریان ناپیوسته بازده حذف ۱۸ درصد بهبود یافته است که نشان دهنده تأثیر مستقیم زمان ماند بر بازده حذف کلیفرم می‌باشد. در نزار زیر سطحی حذف کلیفرم در اثر گیر افتادن در فیلتر ماسه‌ای و ضعیف شدن آنها در اثر گرسنگی و در نهایت مرگ کلیفرم‌ها اتفاق می‌افتد [۶]. در خصوص حذف کل کلیفرم در نزارهای مصنوعی و در جریان پیوسته گزارشهای متعددی در مقیاس واقعی ارائه شده است، ولی در جریان ناپیوسته معدود گزارشهایی در مقیاس آزمایشگاهی موجود است که می‌توان به گزارش راگوسا و همکاران^۱ اشاره نمود که افزایش بازده حذف در

¹ Ragusa et al.

جریان ناپیوسته را تأیید می‌کند [۲۱]. با بررسی داده‌های پایلوتی این تحقیق، در جریان ناپیوسته بازده حذف نیزار ۷ درصد افزایش نشان می‌دهد که افزایش قابل توجهی نمی‌باشد. بنابراین به نظر می‌رسد که در نیزارهای مصنوعی عوامل مهم‌تری از زمان ماند در افزایش بازده حذف تأثیر دارند که عبارت‌اند از طول بستر، قطر شنزار، ضریب تخلخل، افزایش توده ریشه نی در بستر و سرعت افقی جریان آب در بستر. شکل ۹ بازده حذف کل کلیفرم را نشان می‌دهد. در مقادیر متوسط TC برابر $10^4 \times 2$ اختلاف بازده حذف ۲/۵ درصد و در TC برابر $10^4 \times 4$ به ۸ درصد می‌رسد. با توجه به اینکه این مقادیر در تمام فاضلابهای شهری مرسوم است به‌نظر می‌رسد بهره‌برداری نیزار در جریان ناپیوسته برای افزایش بازده حذف TC چندان ضرورت ندارد. در مقادیر متوسط کلیفرم ورودی در ازای هر مترمربع از بستر در جریان پیوسته ۰/۷۴ درصد و در جریان ناپیوسته ۰/۷۶ درصد بازده حذف نشان داده است. بنابراین برای افزایش بازده از ۹۶/۵ به ۹۹/۷۵ درصد یا باید نیزار در جریان ناپیوسته بهره‌برداری شود و یا آنکه مساحت بستر به ۱۳۳ متر مربع افزایش یابد.

۴- نتیجه‌گیری

۱- نیزارهای مصنوعی زیر سطحی در صورت راهبری مناسب روش مطمئنی برای تصفیه فاضلاب شهری و حصول استانداردهای زیست محیطی می‌باشند.
۲- انتخاب پیش تصفیه مناسب برای نیزار نه تنها باعث افزایش

بازده خروجی شده بلکه در راهبری نیزار نیز فوق العاده مؤثر می‌باشد.

۳- بهره‌برداری نیزارهای مصنوعی در جریان ناپیوسته در صورت در دسترس نبودن زمین کافی جهت گسترش بستر، روشی مناسب برای افزایش بازده خروجی می‌باشد.

۴- با ایجاد جریان ناپیوسته در برکه‌های بی‌هوازی مجهز به چاله هاضم و نیزارهای زیر سطحی بازده حذف به نسبت جریان پیوسته به شکل مستقل و ترکیبی به شرح جدول ۳ افزایش نشان داد.

۵- به منظور حذف BOD_5 ایجاد جریان ناپیوسته در برکه بی‌هوازی، نیزار زیر سطحی و تلفیق آنها با هم روشی مؤثر و کاربردی می‌باشد.

۶- برای حذف TSS، TKN و TP ایجاد جریان ناپیوسته در برکه بی‌هوازی و نیزار به‌طور مستقل مفید بوده ولی در تلفیق آنها با همدیگر ضرورتی ندارد.

۷- برای حذف TC ایجاد جریان ناپیوسته در برکه بی‌هوازی مفید می‌باشد ولی در نیزار زیر سطحی و در تلفیق برکه و نیزار ضرورتی ندارد.

۸- به‌منظور حذف نیتروژن در نیزارهای زیر سطحی علاوه بر شرایط عنوان شده در مراجع، قطر شنزار و نوع گیاه فوق العاده مؤثر است.

۹- برای حذف فسفر در نیزار علاوه بر شرایط عنوان شده در مراجع، ابعاد بستر و قطر شنزار بسیار مهم است.

۵- مراجع

1- Crites, R.W. (1994). "Design criteria and practice for constructed wetlands." *Water Science and Technology*, 29 (4), 1-5.

۲- بدلیانس قلی‌کندی، گ. (۱۳۸۱). *طراحی فرایندهای فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی تصفیه فاضلاب*، انتشارات دانشکده صنعت آب و

برق (شهید عباسپور)، انتشارات شرکت نیرو.

3-Portier, R. J., and Palmer, S. J. (1989). *Wetland microbiology from function processes, constructed wetlands for wastewater treatment*, Lewis Pub, Albany.

4- McBride, Chris, C., and Tannere, G. (1998). *Modeling biofilm nitrogen transactions in constructed wetland microcosms with fluctuating water Levels*, National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA), Hamilton, Newzealand 60 otto R. Sten.

5- Stein, O.R., Borden, D.J. (2003). *Does batch operation enhance oxidation in subsurface constructed wetlands*, Department of Biological and Agricultural Engineering, University of Georgia, GA.

- 6- Selma, C.A. (2001). "Treatment of wastewater by natural systems." *Environmental International*, 26 (3), 189-195.
- 7- Winthrop, C. Allen. (2003). *Plant species and temperature effects on the K-C first- order moder for COD removal in batch-loded SSF wetlands*, Department of Civil Engineering and the Center for Biofilm Engineering, Montana State University, Bozeman, MT 59717, USA.
- ۸- ندافی ، ک.، نبی زاده ، ر. (۱۳۷۵). (ترجمه) *برکه‌های تثبیت فاضلاب اصول طراحی و اجرا، سری کتاب‌های بهداشت جهانی (WHO)*، چاپ اول، انتشارات مهارت.
- 9- Tchobanoglous, G., and Burton, F. (1991). *Wastewater engineering treatment, disposal and reuse*, 3rd Ed., McGraw- Hill , Metcalf and Eddy International Edition Engineering Series, New York.
- 10- Eckenfelder, W.W. (1970). *water quality engineering for practising engineers*, CBI Pub., New York ,USA.
- 11- Mara, D.D., Cawley, L.R., Arridge, H. M., and Silva, S.A. (1970). *Biological wastewater treatment: stabilization pond*, IWA Pub., Rio de Janeiro , Brazil.
- 12- Mara , D.D. (1989). *Sewage treatment in hot climates*, John Wiley , London , UK, 127-141
- 13- APHA. (1992). *Standard method for the examination of water and wastewater*, section 9020A and 9020B, USA.
- 14- Gloyna, E.F. (1981). *Waste stabilization pond*, WHO, Monograph Series 60, World Health Organization, Geneva, 11-19: 145.
- 15- Hammer, R. H., Knight, R.L. (1996). *Treatment wetland*, Boca Raton, FL, CRC Press, USA.
- 16- Otto, R.S., Corvalan, C., Gregory, C.O., Ramirez-Zea, M., and et al. (2006). "Plant species and temperature effect on the K-C* first-order model for COD removal in batch-loaded SSF wetlands." *Ecological Engineering*, 40 (2), 100-112.
- 17- Rajbhandari, B. K. (2004). *Environmental engineering and management*, Asian Institute of Technology, Klong Luang, Pathumthani 12120, Thailand.
- 18- Molle, P., Lienard, A., Grasmick, A., and Iwema, A. (2006). "Effect of reeds and feeding operations on hydraulic behavior of vertical flow constructed wetlands under hydraulic overloads." *Water Research*, 40 (3), 606-612.
- 19- Soli, J Arceivala (1988). *Wastewater treatment for pollution control*, Tata McGraw-Hill Publishing Company, New Dehli.
- 20- Isfahan Water and Wastewater Company. (1984). *Wastewater treatment by waste stabilization ponds*, water and wastewater company pub. Isfahan.
- 21- Ragusa, S.R. (2004). "Indicators of biofilm development and activity in constructed wetlands microcosms." *Water Research*, 38 (12), 2865-2873.